

伝統的構法の楔をもつ仕口のめり込みメカニズム

Embedment Mechanism of Traditional Wooden Joints with Wedges

棚橋 秀光¹・大岡 優²・伊津野和行³・鈴木祥之⁴

Hideaki Tanahashi, Yu Ooka, Kazuyuki Izuno and Yoshiyuki Suzuki

¹ 立命館大学 客員研究員 衣笠総合研究機構 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

Visiting Researcher, Ritsumeikan University, Kinugasa Research Organization

² 立命館大学 総合科学技術研究機構/日本学術振興会 特別研究員 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

Research Fellow, Ritsumeikan University/JSPS, Research Organization of Science and Engineering

³ 立命館大学教授 理工学部都市システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

Professor, Ritsumeikan University, Dept. of Civil Engineering

⁴ 立命館大学教授 衣笠総合研究機構 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

Professor, Ritsumeikan University, Kinugasa Research Organization

Wedges of traditional wooden buildings are used in order to stiffen the joints. Also, cyclic loadings make the joints loose due to permanent compressive displacements and slip out of wedges. However, their behaviors and mechanisms have not been established so far. The authors carried out loading tests of column tie-beam joints with four types of wedges and the effects of wedges and cyclic loadings on the restoring force characteristics were investigated. Then, their embedment mechanisms are made clear. These results will contribute the seismic evaluation of traditional wooden buildings.

Keywords : *traditional wooden joint, embedment, wedge, loading test, restoring force characteristics*

1. はじめに

貴重な文化財を含む神社・仏閣、町家、古民家などの伝統木造建築物においては、地震時における仕口（接合部）の回転抵抗による復元力の適切な評価が最も重要となる。著者らは柱貫接合部の復元力は主に回転めり込み抵抗に起因すると考え、十字型通し貫仕口の弾塑性にわたる復元力のメカニズムとその復元力特性の定式化を提案¹⁾した。しかし、実際の仕口では接触部の密着度を向上させるために楔を用いることが多く、楔の果たす効果および緩み挙動を含めた接合部性能の把握が耐震評価上の重要な課題となる。

楔に着目した報告は少なくない^{2)~8)}が、種類の異なる楔の仕口の締固め効果やメカニズム、楔特有の拔出しや繰返し載荷による仕口の復元力の低下挙動などに関する解明は十分でないと考えられる。

本研究では、楔を含む仕口のめり込みメカニズムの解明と復元力特性の定式化を目指して、形状や樹種の異なる楔を用いて、楔の挙動に着目した実験を二段階にわたって行った。樹種や楔形状との組合せは多数考えられるが、大きな傾向を把握するための第一段階として、4種類の楔をもつ十字型通し貫仕口の実験1を行い、樹種・楔形状による挙動と復元力の差異の概要を把握した⁹⁾¹⁰⁾。続いて、楔形状を見直したうえで、4種類の楔をもつ十字型通し貫仕口の実験2を行った。本論文は実験1の結果を踏まえるとともに、主に実験2の結果をもとに、楔を持つ仕口のめり込みメカニズムと復元力特性に及ぼす楔の効果、繰返し載荷に伴う仕口の緩みのメカニズムを解明しようとしたものである。

2. 楔をもつ仕口実験の概要

実験 1（追加試験体を除く）では図 1 に示すように、タイプの違いを強調して長さが短くテーパの傾斜のきつい形状・寸法にした。実験結果から T、C、D タイプでは楔による初期剛性増大効果が見られたが、 $C > T > D$ の順で楔の拔出しやすい傾向があること、拔出すと復元力が低下すること、P タイプは初期剛性増大効果は期待できないが、大変形でも復元力低下は少ないなどの特性がわかった。実験 2 ではこれらの結果を踏まえるとともに、大工・棟梁へのヒアリングに基づいて図 1 の実情に近い形状・寸法に見直した。

Tタイプ ：三角形の楔を2枚重ねた一般的な重ね楔で、打ち込むことで傾斜により締まる効果がある一方、拔出しの要因ともなる。
Cタイプ ：Tタイプの斜辺の中心部3mm程度の膨らみを付けたもの。接触面が曲面のため打ち込み易いが拔出しやすい傾向がある。
Pタイプ ：長方形の楔を1枚用いたもの。本実験では楔を打ち込み易くするために片隅にスリットまたはテーパをとる。締固めが不完全な傾向がある。
Dタイプ ：仕口内部で左右の楔が分離し、独立に動く特性があり、Tタイプと共に比較的多く見られ、両楔と言うことがある。

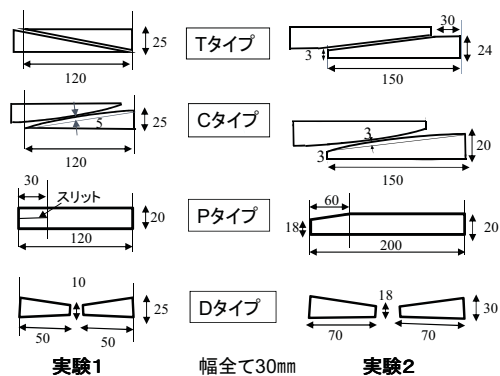


図 1 実験 1、2 の楔の形状・寸法

実験 2 に用いた試験体は、最も単純で楔の特性が比較的表れやすい通し貫仕口の十字型試験体とし、貫 30mm×100mm、柱 100mm 角で各タイプ 3 体とした。樹種は貫・柱・楔ともスギで柱は芯持ち材、貫の木口の年輪方向は、仕口の復元力特性に影響をすることから全ての試験体で年輪の接線方向圧縮となるように部材を加工した。ただし、楔木口の年輪方向は切り出した貫材の局所的変動によりかなりばらついた。

図 2 に実験セットアップを示す。载荷は 8 段階の载荷ステップ（変形角 1/240, 1/120, 1/60, 1/30, 1/20, 1/15, 1/10, 1/5rad）で各ステップ 3 サイクルの正負交番繰り返しとした。载荷速度は载荷点の変位制御で 30mm/min から順次 90mm/min まで変化させた。計測項目は载荷点変位と载荷荷重、仕口の柱・貫の回転変位に加えて、楔の木口の水平変位である（P タイプ除く）。仕口の変位計は载荷の最後まで計測したが、楔用はストローク 25 mm の接触型変位計で計測したため、計測限界で取り外した。図 2 の左方向载荷を正（押し）右方向载荷を負（引き）とする。貫材から事前に 3 個の横圧縮試験体採取して、横圧縮ヤング係数と降伏応力度を求めた。実験は 2012 年 10 月に立命館大学セル実験室にて行った。

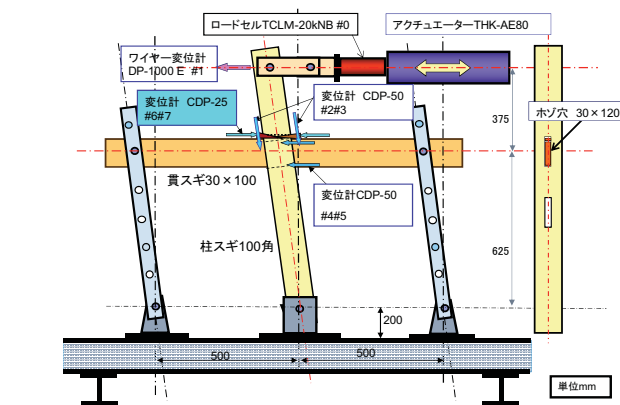


図 2 実験セットアップ

3. 実験結果の概要

（1）各タイプの復元力の全体的特徴

実験 2 の各タイプ 3 体の実験結果より、復元力特性の傾向の異なる 2 体を選んで図 3～図 6 に示す。復元力特性は変位計より計測した仕口の回転角 θ (rad) とモーメント M (kNmm) の関係で示している。また、各図には、1/60rad、1/15rad 時の復元力特性も併せて示すが、微小変形段階は改めて次章で詳細に検討する。

T タイプ・C タイプでは、変形が進行した場合、耐力低下が見られるが、その要因としては、楔が拔出することによる支圧力（楔を打込んだ際に生ずる内部圧縮応力）の低下、柱との接触面の緩みまたは離間が推察される。また、同一ステップにおいても、繰返し载荷によって耐力が低下した（1/30rad 時の 1 回目に対する 3 回目の低下率：T タイプで 17～46%、C タイプで 29～46%）。このような繰返し载荷に伴う耐力の低下

には、図7のT1の代表例に示すように、楔の拔出し量（左右の楔の合計拔出し量）が大きく関係している。 $1/10\text{rad}$ を超える大変形領域においては、図3、4から明らかなように、Tタイプ・Cタイプともに楔が拔出しつくして後、更に回転変形が進むと、めり込み反力が大きくなって耐力が再び増加する結果を示した。

Pタイプ・Dタイプは、変形の増加とともに一貫して耐力が増加する傾向が見られる。

Dタイプでは、変形の初期段階から楔の外端部が貫にくい込むことにより引掛りができて、それ以降の楔の拔出しが少なくなり、耐力も他タイプより比較的大きくなった。

T・C・Dタイプでは、 $1/60\text{rad}$ 時の履歴ループが凸レンズ状または平行四辺形の形状になり、実験開始時点における楔による初期の支圧力とその摩擦の影響が考えられるが、そのメカニズムは5章で述べる。

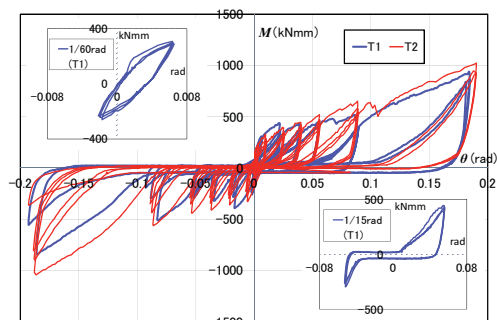


図3 Tタイプの復元力特性

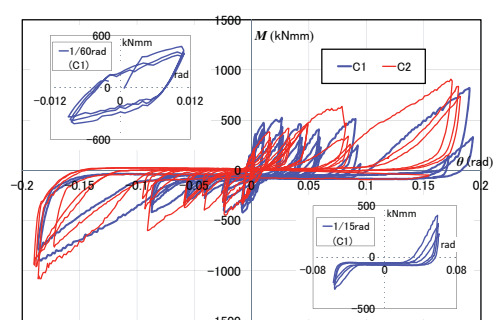


図4 Cタイプの復元力特性

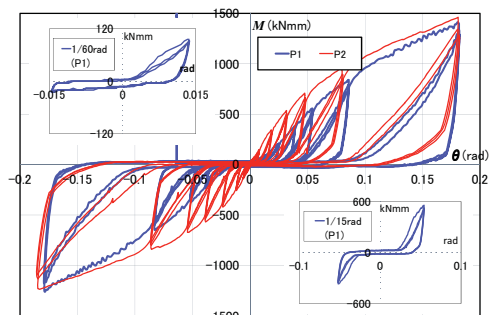


図5 Pタイプの復元力特性

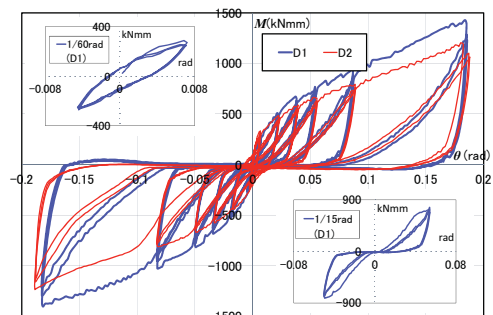


図6 Dタイプの復元力特性

(2) 楔の拔出し挙動

実験1では、左右の楔の上下関係とテーパの傾斜方向、載荷方向との関係に焦点をあてて楔の動きを分析した¹⁰⁾が、実験2では左右の外側への拔出し実測値の合計を拔出し量と定義し、楔の傾斜角度により幾何学的に支圧力に関連させることで、摩擦力の評価が可能になるものと判断して以下、拔出し量で評価する。

T・C・Dタイプにおける楔の拔出し量（各3試験体の平均値）を図8に示す。図より拔出し量はCタイプで一部計測限界を超えた可能性があるが、それ以外は $1/15\text{rad}$ までは最大23mm程度で、 $C>T>D$ の順で拔出し量が多いことがわかった。ただし、大変形レベルではこれ以上の拔出し量が確認された試験体もある。

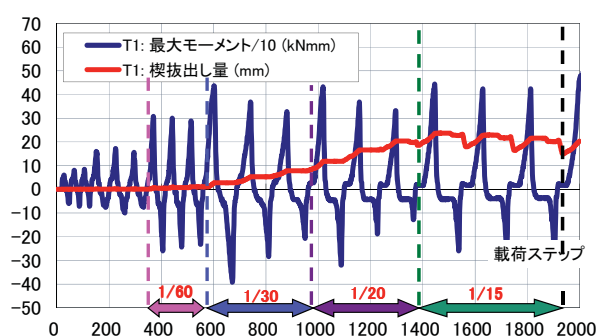


図7 楔拔出し量とモーメント低下の関係(T1)

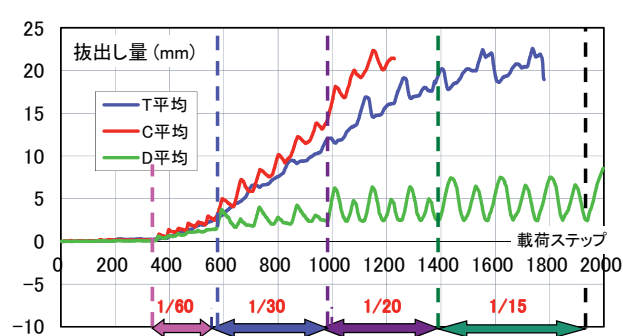


図8 楔拔出し量と載荷ステップ

楔のタイプ別に 1/120rad、1/15rad のモーメントの平均値 (kNmm:正負で大きい方) を比較すると、 $(M_{1/120}:M_{1/15}) = T (218:448)$ 、 $C (290: 436)$ 、 $P (114:776)$ 、 $D (154:780)$ となった。T・Cタイプは、楔の効果により 1/120rad 時の耐力は大きくなるが、1/15rad 時には、楔の拔出しによって P・Dタイプよりも耐力が小さくなった。

4. 各タイプの载荷初期の復元力特性

楔をもつ仕口の挙動とメカニズムを解明するにあたって、载荷初期の楔特有の挙動に焦点をあて、各タイプの 1/20rad までの代表的な復元力特性のグラフを拡大して図9～12に示し、タイプの違いによる特性を分析する。図中の枠内の数字 1/120, 1/60, 1/30, 1/20 は载荷レベル(rad)を示す。

a) Tタイプ

1/120rad あたりまでは初期の弾力的な挙動を示した後、1/60rad で凸レンズ状の繰り返しがおこる。上に凸のカーブで剛性の低下傾向は見られるが、3回の繰り返しでもループはほとんど重なり弾性段階と思われる。1/30rad のレベルになると繰り返しごとに抵抗モーメントは順次低下する。これは図7の楔の拔出しと相関性が高く、拔出しにより支圧力が減少するメカニズムが推察できる。1/20rad の変形レベルになると最大モーメントは頭打ちとなり、P、Dタイプとは異なる傾向を示す。

b) Cタイプ

復元力特性は Tタイプと似た傾向を示すが、Cタイプは楔の打ち込みの手ごたえがあるにもかかわらず、他のタイプにくらべ支圧力の低下が激しく、滑りやすい傾向が伺われる。1/60rad では履歴ループは凸レンズ状よりは平行四辺形に近く、ループの左右の幅の拡大は楔の滑り量が大きいことによると推察する。またグラフの凸凹が多いのは、摩擦の滑りと付着を交互に繰り返す Stick-Slip の振動現象¹¹⁾とみられる。これらの傾向は、実験1, 2含めてCタイプの試験体に顕著に見られる。

c) Pタイプ

P1は初期剛性の立ち上がりが 0.004rad 程度から始まり、全体にグラフが右に寄っており、楔の効果は見られず、初期の接触面の隙間に起因すると推定される。また、荷重減少時の履歴ループは重なっており、繰り返しによる抵抗モーメントの低下はほとんどない。同じPタイプでもP2は若干の支圧力の導入が見られ、初期の高剛性も見られた。このタイプでは全体に、楔打ち込みによる支圧力導入は施工精度に左右されやすく、剛性がばらつく傾向がある。

d) Dタイプ

T・Cタイプと比べ全体にグラフ勾配が緩い傾向があるが、抵抗モーメントは増加し続け、繰り返しによる強度の低下はほとんどない。楔の下面が貫にめり込んで滑りにくくなる挙動が観察されており、図8でも確認できる。ただし、このタイプの楔は長さが短いため回転しやすく、実験1では傾斜して転んだようにめり込んだ場合もあり、楔がもっと長い場合でも同じ挙動を示すかは確認できていない。

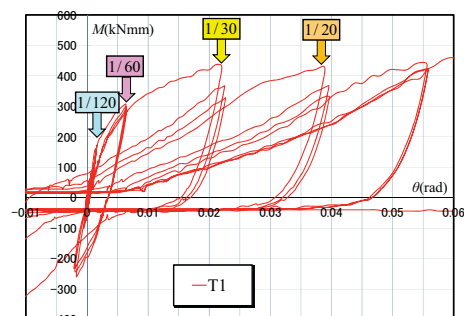


図9 T1の復元力特性

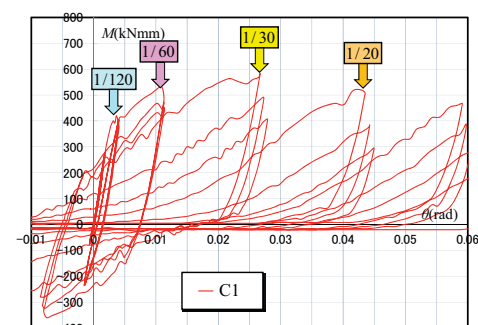


図10 C1の復元力特性

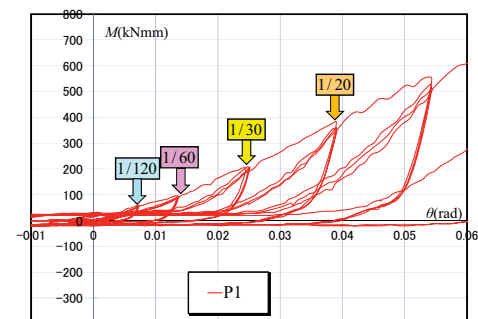


図11 P1の復元力特性

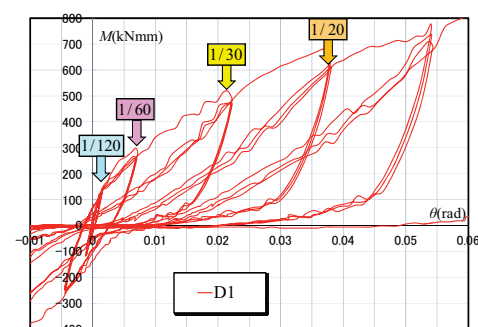


図12 D1の復元力特性

5. 楔のめり込みメカニズムとモデル化

楔をもつ仕口の挙動とメカニズムを解明するにあたって、著者らの既往の弾塑性パステルナーク・モデルに基づく回転めり込みのメカニズム¹⁾を基本に、楔をもつ仕口の回転めり込みの力学モデルをいくつかの変形段階に分けて以下に示す。その際、導入支圧力が大きく、初期の線形挙動、履歴ループが明瞭に表れた実験1の柱鋼材・貫ヒノキ・楔ケヤキのHKシリーズのHK-Tの復元力特性の履歴ループを1/240, 1/120, 1/60, 1/30, 1/20radの段階に分けて図13～15に示して分析の一助とする。この試験体は、ある棟梁によって最も望ましい楔形状とハンマーによる最大限の打撃力で打ち込まれた追加試験体(HK-T, HK-C, HK-P)3体のうちの1体で、写真1のように楔の長さが長くテーパの勾配が緩やかなことが特徴である。

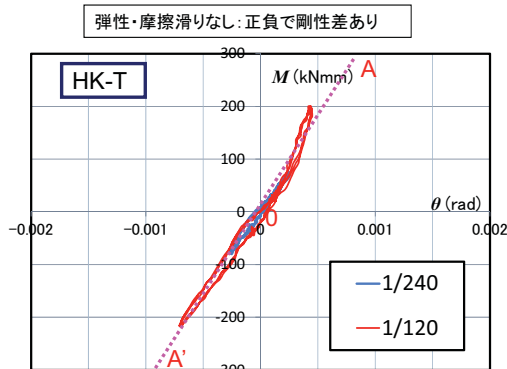


図13 回転めり込みの線形弾性挙動

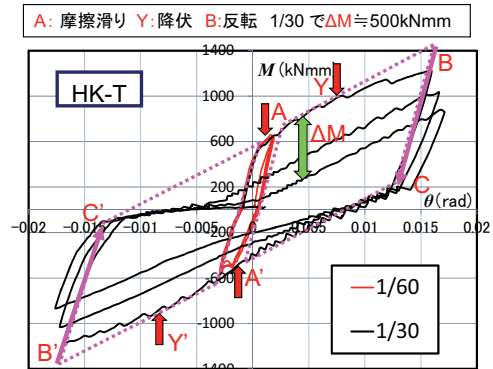


図14 摩擦滑りと支圧力減少・回転めり込み降伏

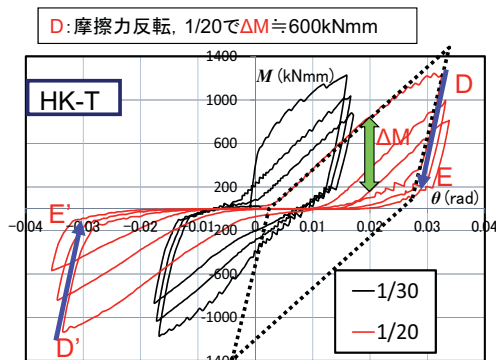


図15 荷重反転による経路と減少モーメント

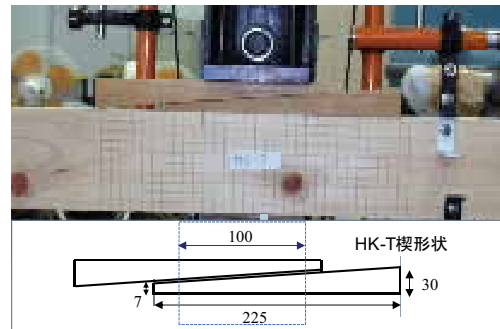


写真1 HK-Tの楔の詳細と載荷状況

(1) 楔が打ち込まれた段階：楔のめり込みモデル

柱のほぞ穴の拘束が十分大きいことから、楔の打ち込みにより一定の圧縮力が仕口内部に導入され、柱ほぞ穴を除く水平断面にはその反力として引張力が生ずる。楔の打ち込みによって強制的に挿入される高さを ΔH とし、その結果導入される仕口内部の圧縮力を支圧力 R_c と称し、 ΔH のめり込み変形をうけて部分圧縮力 R_c が発生する力学モデルを考える。図16にT、C、Dタイプの場合を示す。なお以下のモデル図では分かりやすくするためにめり込み変形を強調して表現している。楔の種類により、打ち込み長さとその結果生ずるめり込み量、発生する支圧力などの差異はあっても、部分圧縮とそれに伴うめり込み変位で楔の力学的効果をパステルナーク・モデルを用いて表現する¹¹⁾。ここではTタイプでほぞ穴高さ $H_m/2$ に対する ΔH_p のめり込み量の場合を(1)式に示すが、部分圧縮が貫の回転めり込みかの载荷条件などを考慮する必要があるほか、他のタイプでは挿入楔有効高さ ΔH_p と载荷幅(柱幅 $2L$ 、楔のめり込み長さ L_w など)で調整する。

楔の打ち込み長さ・高さで支圧力の関係は、貫・楔の形状・寸法、貫・楔の横圧縮ヤング係数、降伏応力度に依存し、楔の種類ごとに別途の整理が必要である。Dタイプについては貫に対する楔のめり込み実験の報告²⁾⁴⁾があり、今後同様なデータの蓄積が期待される。

B :貫幅, H_m :ほぞ穴高さ, $2L$:柱幅, ΔL :端距離(ここでは無限大), $2\Delta H_p$:挿入楔有効高さ,
 E :貫・楔(ここでは同樹種で一体と仮定)の横圧縮ヤング係数, γH :無次元特性値,

$$R_C = \frac{4EBL\Delta H_p \zeta_p}{H_m} \quad (1)$$

ここで, $\zeta_p = 1 + 1/(\gamma L)$:パステルナーク・モデル(PM)の均等めり込みの剛性増大率¹²⁾

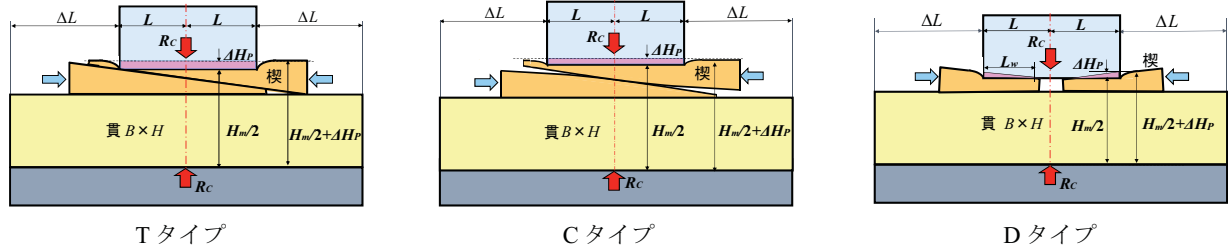


図16 楔のめり込みモデル

(2) 回転めり込みの初期段階: 楔Aモデル

図17に示すように、通し貫に柱の上下ブロックが楔の打ち込みにより上下 ΔH だけめり込んだ状態で、O 中心の回転角 θ の回転により紫色の多角形 ABCD、A'B'C'D'の回転めり込みが起きた状態を考える。载荷初期で接触面 AB、A'B'が離間も摩擦滑りも生じない段階を楔Aモデルと称する。初期の履歴は図13の HK-T に示すように正負の剛性差はあるが、AOA'に沿って原点と最大値間の直線的な線形弾性の往復となる。その剛性は摩擦滑り発生以前の高い剛性で、図14の $1/60\text{rad}$ の段階になると摩擦滑りが起こり、後述のように摩擦抵抗は一定値をとるため、回転めり込みのみの剛性(図14の AY の勾配で Y は降伏点とし、Y より先に離間 S が始まる場合もありうるが、その場合は AS) が明瞭に現れる。図17の柱と貫・楔の接触長さ L_θ は柱幅 $2L$ と同じで、楔のない仕口の場合の接触長さ L の2倍となり、M 中心の MA、MB の回転めり込み剛性・抵抗がほぼ倍増する。これが楔の有無による決定的な違いの第一の点である。

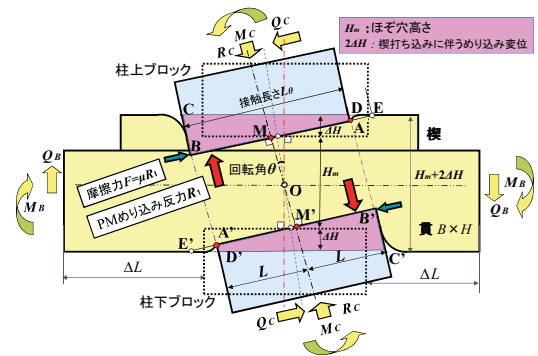


図17 回転めり込みの楔Aモデル

回転めり込みによる摩擦抵抗は、M 中心の MB と MA の回転めり込み接触面の圧縮力は同じ大きさで逆向きであるため打ち消され、基本的に仕口の回転角に依存しない。すなわち、支圧力 R_C による回転に伴う摩擦抵抗モーメントは一定値をとる。この結果は北守らの摩擦抵抗が一定との報告³⁾と整合する。これが楔の有無による違いの第二の点である。この摩擦抵抗モーメントは回転めり込み抵抗と合算されて履歴ループは図14の ABCA'の平行四辺形となる。回転めり込み降伏または離間が始まると MB と MA の接触面の圧縮力の均衡は崩れて非線形になり YB 間のように上に凸なカーブになる。ちなみに回転めり込み抵抗の直線 AB を延長した縦軸との交点が摩擦抵抗モーメントとなる。ただし、摩擦抵抗には側面水平抵抗¹⁾が含まれ回転角に依存する傾向があり、楔のない仕口よりめり込み変位(図17の BC 間距離)が大きいことから無視できない場合がありうる。

(3) 回転めり込みの進展段階: 楔Bモデル

仕口の回転角が増大して、図18の A 点の外側では離間が生ずる段階を楔Bモデルと称する。接触面 AB の長さ L_θ は $2L$ より短くなり、回転めり込み抵抗も幾何学的非線形状態に移行し、弾性的であっても剛性が低下する。したがって、この段階での繰返し载荷では支圧力は初期とほぼ同じレベルにあるため、摩擦抵抗のループと複合して図14のように、復

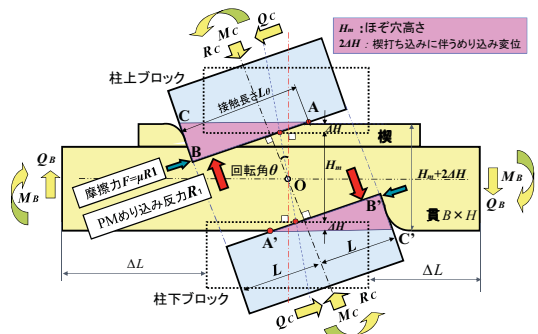


図18 回転めり込みの楔Bモデル

元力特性のループは凸レンズ状または平行四辺形の形をとるが、載荷を繰り返すごとに楔の抜け出しに応じて支圧力が減退し、例えば $1/30\text{rad}$ のステップの3サイクルのモーメント抵抗は ΔM だけ下部に平行移動したループとなる。図15の新たな $1/20\text{rad}$ のステップとなるとさらに低下し、原点付近のモーメント抵抗はほぼゼロとなりスリップ性状が顕著になる。

(4) 減少載荷と再載荷段階：楔Cモデル

再載荷段階の楔Cモデルを図19に示す。図14、15の履歴ループのように、載荷が減少に転ずる瞬間に摩擦の作用方向がB（またはD）で反転し、C（E）に至って逆方向の摩擦滑りが始まる。ある載荷の最大回転角 θ のうち一部は弾性的な復元をするが、かなりの部分は残留変形となりその回転角を β とする。 β 以内に回転角が戻ると支圧力により接触が維持される範囲では、離間は起こらないが支圧力は減退することとなる。その残存する支圧力のもとの載荷の戻りの段階での回転めり込み抵抗に摩擦抵抗が加算されて変位ゼロに戻る。支圧力が完全になくなり離間距離 δH が起こると接触が起こらず抵抗も発生しない段階がある。

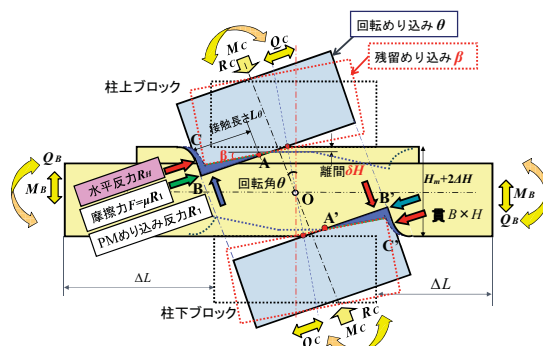


図19 再載荷段階の楔Cモデル

さらに負載荷で正載荷と同様なループをたどった後、2サイクル目の正の再載荷に進むと、めり込んだ変形のうち弾性復元した部分への再めり込みが起こる。そのめり込み抵抗によりモーメント抵抗が増大するが、直前に戻った経路をたどることはなく、履歴の最大点を志向して上昇する。こうして、再載荷の経路は残存支圧力、摩擦滑り、降伏、離間により、図13～15のように順次変化する。

この往復の経路の差の要因には、支圧力、降伏、離間のほか、摩擦抵抗とその反転に伴う高剛性（図14のBCの剛性など）と柱エッジの側面水平反力 R_H の弾性的復元力¹³⁾も考えられるが、現段階では実証できていない。

このようにして載荷初期の復元力特性の履歴ループを概念的に整理すると図20になる。

ここで、剛性変化の主な特性点を①載荷初期の高剛性から摩擦滑り開始点A②載荷減少で反転する点BまたはD③減少載荷で逆方向の摩擦滑り開始点CまたはE④圧縮降伏開始点Y⑤離間開始点S⑥楔の抜け出し開始点Fとする。このうちY、S、Fの順序は前後すると共に複合して発生する可能性もあり判別は難しい。

図14などに見られる右上がりの平行四辺形の履歴ループから回転めり込みの成分(A_Yの勾配)を差引くと支圧力が一定の条件で図20の $OF_0F_1F_2F_1'F_2'$ の平行四辺形が得られ、摩擦抵抗のみの履歴ループとなり、楔が摩擦ダンパーの機能を持つことが分かる。変形が進んでFで支圧力が減退し始めると平行四辺形の高さが減少し、縦軸を横切る摩擦抵抗モーメントから摩擦係数を仮定すればその段階の支圧力が求められる。

OF_0 の勾配は摩擦が滑り始める前の初期剛性（実験2では $K_f=90\sim120\text{kNm/rad}$ 、HK-Tでは 340 kNm/rad 程度）で摩擦の反転の剛性 F_1F_2 と同じで、主にシャープパネルのせん断変形によると推察されるが、そのメカニズムの解明は今後の課題としたい。

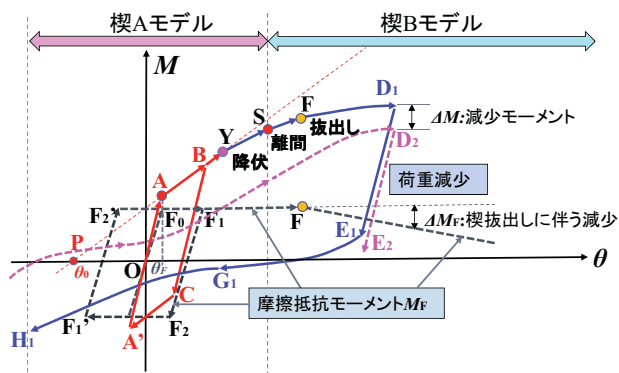


図20 復元力の履歴ループと剛性変化の概念図

6. まとめ

楔の仕口の復元力特性に及ぼす効果に関する主な知見をまとめると以下になる。

① 4種類の楔が復元力特性に与える違いが明確になった。

T、Cタイプの楔は初期の剛性・耐力増大に大きく寄与するが、変形に伴い楔の抜け出しが進むと緩みに

応じて剛性・耐力が低下する。Cタイプの楔が他に比べ抜出す傾向が強い。

Pタイプは、締め固め効果は施工精度に依存してばらつくが、楔の抜出しは基本的にないため、楔のない通し貫仕口と同様に大変形でも耐力の増大傾向がある。

Dタイプの楔は剛性・耐力増大に寄与する程度はT、Cタイプほど大きくはないが、大変形での耐力低下は少ない。これは楔が比較的短いために貫にめり込んで抜出しにくい傾向によるもので、楔の形状・寸法に依存する可能性があるが確認はできていない。

以上の傾向は、楔の形状・打ち込み程度・樹種と材料特性の組合わせなどにも依存する可能性はあるが、大きな傾向は把握できたと考える。

- ② 楔を持つ仕口のめり込み抵抗のメカニズムを解明し、復元力特性に及ぼす楔の効果を導入支圧力による摩擦抵抗・回転めり込み抵抗の増大という形で評価できるとともに、楔が抜出すと支圧力が減退し、楔の効果が低下することも説明できる。あわせて、楔の支圧力による摩擦抵抗が摩擦ダンパーの機能を持つことを明らかにした。
 - ③ 繰返し載荷に伴う復元力特性の履歴ループは、楔の支圧力による摩擦抵抗と滑り、回転めり込みの塑性化と残留変位の組み合わせで、仕口の緩みを含めて概ね説明できる。
- なお、楔をもつ仕口の復元力特性の履歴ループの詳細な解明と復元力特性の定式化は改めて論ずる。

謝辞：本研究の一部はグローバルCOE『歴史都市を守る「文化遺産防災学」推進拠点』（代表 大窪健之）および東本願寺耐震調査研究委員会（委員長 鈴木祥之）による。関係各位のご協力に感謝します。

楔の形状・加工に関して貴重な意見とご協力をいただいた京都府文化財保護課小宮睦氏・山口保広氏（当時）および楔の形状ヒアリングにご協力いただいた大工・棟梁各位に感謝します。

参考文献

- 1) 棚橋秀光・鈴木祥之：伝統木造仕口の回転めり込み弾塑性特性と十字型通し貫仕口の定式化, 日本建築学会構造系論文集, Vol.76, No.667, pp.1675-1684, 2011.
- 2) Kato Y. and Komatsu K.: Strength and Deformation of Semi-Rigid Timber Frames Depending on the Embedment Resistance of Timber, Wood research, Vol. 87, pp.39-41, 2000.
- 3) 北守顕久・加藤泰世・片岡靖夫・小松幸平：伝統木造における貫接合部の耐力発現モデルの提案と実験的検証, 木材学会誌, Vol.49, No.3, pp.179-186, 2003.
- 4) 坂口裕美・坂田弘安：伝統木造民家における柱・貫接合部の力学的挙動に関する実験的研究, その3 柱・貫・楔の部分圧縮試験, 日本建築学会大会学術講演会梗概集, C-1, pp.1-2, 2008.
- 5) 楠寿博, 木林長仁, 伊東正：貫接合部の曲げ性能実験と性能向上のための一つの試み, 日本建築学会大会学術講演会梗概集, C-1, pp.509-510, 2009.
- 6) 今村友紀, 北原昭男：様々なくさびを用いた貫構造に関する耐震性能評価, 日本建築学会九州支部研究報告, pp.677-680, 2011.
- 7) 吉田拓矢・田村優衣・古川忠稔・藤森 繁：柱・貫接合部における種々の楔の性能に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演会梗概集, C-1, pp.443-444, 2012.
- 8) 石原由美子・小島崇徳・羽生田善将・井戸田秀樹・小野徹郎：仕口形状を考慮した柱・貫接合部のモーメント抵抗機構, その2. 貫および楔の水平変位量, 日本建築学会大会学術講演会梗概集, C-1, pp.437-438, 2012.
- 9) 大岡優・植野友介・棚橋秀光・伊津野和行・鈴木祥之：伝統的構法の各種楔をもつ仕口の実験的研究（その1 実験概要と復元力特性）, 日本地震工学会大会梗概集, pp.258-259, 2012.
- 10) 植野友介・大岡優・棚橋秀光・伊津野和行・鈴木祥之：伝統的構法の各種楔をもつ仕口の実験的研究（その2 楔の挙動）, 日本地震工学会大会梗概集, pp.260-261, 2012.
- 11) 曾田範宗：摩擦と潤滑, 岩波, pp.71, 1954.
- 12) 棚橋秀光, 大岡優, 伊津野和行, 鈴木祥之：木材のめり込み降伏メカニズムと均等めり込み弾塑性変位の定式化, 日本建築学会構造系論文集, Vol.76, No.662, pp.811-819, 2011.
- 13) 棚橋秀光・大岡 優・伊津野和行・鈴木祥之：伝統木造のT字型通し貫仕口のほぞの中心移動, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, pp.445-446, 2012.